

Розробка функціональної моделі вимірювача температури

Н. М. Защепкіна¹, М. П. Світа²

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна
panic1604@gmail.com

² ТОВ "НВФ "ПРОБА", вул. Пшенична, 2, 03134, Київ, Україна
max15s@ukr.net

Анотація

Тонкоплівкові платинові термометри опору різної конструкції і виконання широко застосовуються у різних галузях промисловості. Діапазон вимірювання температури цими термоперетворювачами знаходиться у межах від мінус 200 °С до 600 °С.

Запропоновано функціональну модель портативного цифрового вимірювача температури в діапазоні від мінус 50 °С до 300 °С на основі давача L416 типу Pt100. Обрано оптимальне схемне рішення включення давача L416 у вимірювальний міст Уінстона із застосуванням однополярної напруги живлення мосту та підсилювача. Запропоноване схемне рішення доцільне при живленні від автономних джерел постійного струму, що дозволяє мініатюризувати прилад і сприяє ефективності енергоспоживання.

Виконано нормування вихідної напруги підсилювача у всьому робочому діапазоні аналого-цифрового перетворювача відповідно до робочого діапазону давача температури, що дозволяє отримати максимальну роздільну здатність аналого-цифрового перетворення при вимірюванні температури.

Розроблено функціональну модель перетворення опору термодавача в цифровий код. Функціональна модель показує, що вихідний код аналого-цифрового перетворювача не залежить від напруги живлення схеми, таким чином реалізується стабільність функції перетворення опору давача в значення коду аналого-цифрового перетворювача.

Давач має нормовану характеристику залежності опору від температури, тому для калібрування схеми вимірювача температури використано прецизійний магазин опору МСР-60М. За допомогою магазину опору МСР-60М можливе калібрування схеми вимірювача температури з невизначеністю 0,07 °С.

Ключові слова: вимірювач температури; термоперетворювач; Pt100; міст Уінстона; ратіометричне живлення.

Отримано: 31.12.2020

Відредаговано: 05.03.2021

Схвалено до друку: 12.03.2021

Вступ

Знаходження температурних показників об'єктів та середовищ у різних галузях промисловості становить більш ніж 50% від усієї кількості інформаційних вимірювальних задач. При вимірюванні застосовують контактні та безконтактні температурні сенсори різних типів: термоперетворювачі опору, термопари, термістори та ін.

Широке розповсюдження отримали платинові термоперетворювачі типу Pt100, відповідно до стандарту DIN EN 60751 [1]. Ці термоперетворювачі виготовляються низкою провідних світових виробників, таких як Heraeus, Honeywell, Omron, Wika та ін. Калібрування термоперетворювачів типу Pt100 здійснюється згідно з інструкцією [2].

Принцип дії платинового термометра опору ґрунтується на залежності електричного опору платини від температури. Цей елемент має нормовану паспортну залежність електричного опору від температури, в порівнянні з термопарами та терміс-

торами. Діапазон застосування цих перетворювачів знаходиться в межах від мінус 200 °С до 600 °С.

Термоперетворювачі Pt100 придатні до застосування у якості первинних перетворювачів (ПП) у складі інформаційно-вимірювальних засобів, призначених, наприклад, для санітарних та екологічних лабораторій промислових підприємств, а також служб екологічного контролю промислових викидів згідно зі стандартами [3, 4]. Типовим представником цього класу ПП є платиновий тонкоплівковий давач температури типу Pt100 компанії Heraeus (Німеччина) L416, на основі якого запропоновано функціональну модель цифрового вимірювача температури.

Постановка проблеми

У процесі реалізації конструкторських задач розробки портативних цифрових вимірювальних засобів на основі мікроконтролерів з вбудованим 12-розрядним аналого-цифровим перетворювачем

(АЦП) у якості вторинних перетворювачів (ВП) постає проблема оптимізації схемного рішення включення та нормування сигналу ПП до робочого діапазону ВП вимірювача температури. Також побудова точної функції перетворення опору давача в значення температури.

Метою роботи є розробка функціональної моделі цифрового портативного вимірювального засобу контролю температури в діапазоні від мінус 50 °С до 300 °С на основі ПП L416. Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі задачі:

- обґрунтування вибраного схемного рішення включення ПП із застосуванням давача L416;
- нормування вихідної напруги диференційного підсилювача (ДП) у всьому робочому діапазоні ВП (діапазон температур від мінус 50 °С до 300 °С);
- розробка функціональної моделі перетворення опору термодавача в цифровий код;
- розробка спеціалізованого програмного забезпечення для калібрування ВП у всьому робочому діапазоні температур (від мінус 50 °С до 300 °С) давача L416 із застосуванням магазину опор МСР-60М у якості імітатора давача.

Виклад основного матеріалу

Давач температури L416 являє собою платиновий тонкоплівний терморезистор типу Pt100 із температурним коефіцієнтом 3850 ppm/K [5]. Діапазон вимірювання у цього давача становить від мінус 50 °С до 300 °С, точність Class A [6]. Давач має мініатюрні розміри 1,5×3,9×1 мм, дві ніжки діаметром 0,25 мм та довжиною 10 мм для під'єднання зовнішніх подовжуючих провідників і нормовану характеристику в усьому діапазоні вимірювань. Номінальні значення відношення опор до температури для давачів типу Pt100 наведено в табл. 1.

Існують двох-, трьох- та чотирьохпровідні схеми включення термоперетворювачів. Трьох- та чотирьохпровідні схеми застосовують для термокомпенсації опорів з'єднувальних проводів давача. При застосуванні трьох- та чотирьохпровідних схем включення давача з відповідними схемними рішеннями можлива повна термокомпенсація

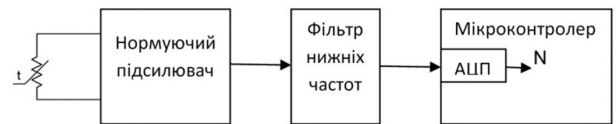


Рис. 1. Структурна схема перетворення термоопору типу Pt100 в цифровий код

з'єднувальних проводів [7]. Але це призводить до збільшення активних компонентів схеми та ускладнення конструктивних рішень. При цьому збільшуються габарити зонду вимірювача та ускладнюється монтаж, що призводить до зменшення надійності конструкції ПП.

У випадку застосування давача L416 існує складність точкового зварювання двох провідників на кожну ніжку діаметром 0,25 мм. Таким чином, на основі давача L416 обрано двохпровідну схему з термостабільними провідниками з компенсацією зміщення характеристики. Типовою схемою включення термоперетворювачів є міст Уінстона, що забезпечує ратіометричне живлення, якщо напруга живлення мосту є також опорною напругою АЦП, що дозволяє компенсувати нестабільність напруги живлення схеми [8].

Оскільки двохпровідна схема не має термокомпенсації в якості з'єднувальних проводів, запропоновано застосувати термостабільний провідник марки МНМц40-1,5 із константану діаметром 0,5 мм, який характеризується дуже малим температурним коефіцієнтом опор та стійкістю проти корозії. Електричний опір одного метра провідника становить 2,5 Ом при питомому опорі константану 0,5 мкОм*м [9].

Таким чином, опір з'єднувальних провідників внесе адитивну складову в результат вимірювання температури.

Нормування вихідного аналогового сигналу ДП полягає в розрахунку такого коефіцієнта підсилення ДП, при якому діапазон зміни опор давача вкладався б у повний діапазон коду АЦП, що забезпечить максимальну роздільну здатність вимірювання температури.

ДП запропоновано виконати на базі операційного підсилювача (ОП) з вхідними та вихідними каскадами "Rail-to-rail", що забезпечує високу чутливість при роботі із сигналами, близькими до рівнів живлення схеми [10].

Таблиця 1

Нормована характеристика давача Pt100 Heraeus

°С	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
Ω	80,31	84,27	88,22	92,16	96,09	100,00	103,90	107,79	111,67	115,54	119,40	123,24
Ω/°С	0,397	0,396	0,394	0,393	0,392	0,391	0,390	0,389	0,387	0,386	0,385	0,384
°С	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Ω	127,08	130,90	134,71	138,51	142,29	146,07	149,83	153,58	157,33	161,05	164,77	168,48
Ω/°С	0,383	0,382	0,380	0,379	0,378	0,377	0,376	0,375	0,374	0,372	0,371	0,370
°С	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
Ω	172,17	175,86	179,53	183,19	186,84	190,47	194,10	197,71	201,31	204,90	208,48	212,05
Ω/°С	0,369	0,368	0,367	0,365	0,364	0,363	0,362	0,361	0,360	0,358	0,357	0,356

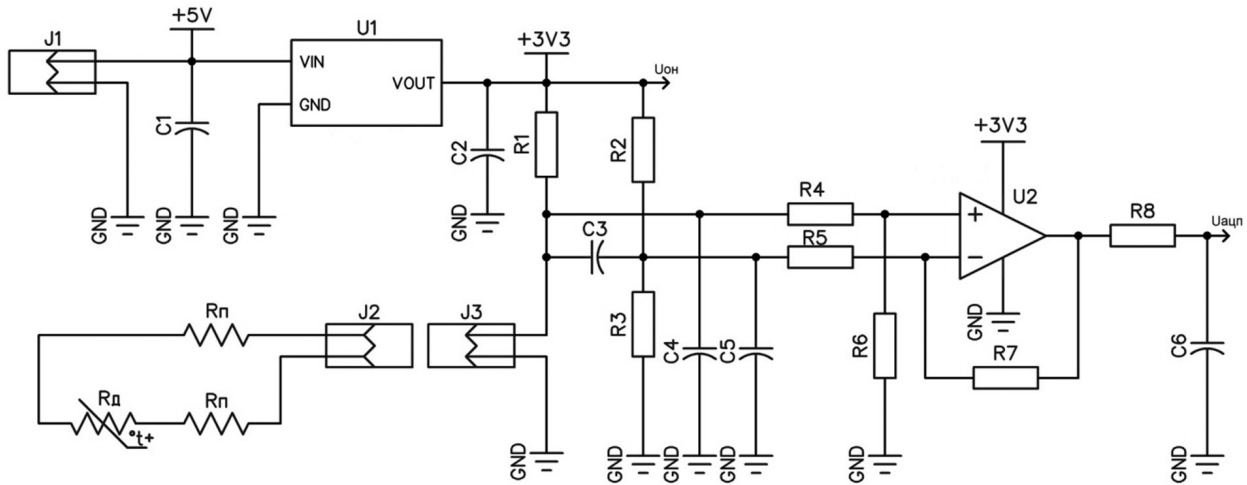


Рис. 2. Електрична принципова схема нормуючого підсилювача

Структурну схему перетворення опору давача в цифровий код N наведено на рис. 1. Схема перетворення складається з давача температури типу Pt100, нормуючого підсилювача, фільтра нижніх частот та мікроконтролера з вбудованим АЦП.

Електричну принципову схему перетворення опору давача в напругу, нормовану до повного діапазону АЦП, наведено на рис. 2.

Живлення схеми на рис. 2 відбувається від лінійного стабілізатора напруги $U1$. Конденсатори C_1 та C_2 виконують роль фільтрів по живленню. Давач Pt100 включено в міст Уінстона, який реалізовано за допомогою резисторів $R_1 - R_3$. Резистор R_1 служить для завдання робочого струму через давач. Опір резистора R_3 рівний значенню давача при температурі $0\text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає 100 Ом. Конденсатори $C_3 - C_5$ у сукупності з резисторами мосту формують фільтри нижніх частот на вході підсилювача.

Коефіцієнт підсилення задається резисторами $R_4 - R_7$. На елементах $R_8 C_6$ зібрано вихідний фільтр нижніх частот ДП. Після проходження фільтра нижніх частот напруга подається на вхід АЦП. Опорною напругою АЦП є напруга живлення мосту Уінстона та підсилювача.

Оскільки опорна напруга АЦП є напругою живлення мосту Уінстона, запропонована схема

забезпечує стабільність функції перетворення опору давача в значення коду АЦП у випадку температурного дрейфу лінійного стабілізатора напруги $U1$ на рис. 2 [11].

Рівняння (1) описує роботу схеми з урахуванням допущень, що ОП ідеальний, струм через опори $R_4 - R_5$ відсутній та вхідний опір АЦП прагне до нескінченності.

$$U_{\text{ацп}} = K_{\text{п}} U_{\text{ж}} \left(\frac{R_{\text{д}} + 2R_{\text{п}}}{R_1 + R_{\text{д}} + 2R_{\text{п}}} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right), \quad (1)$$

де $U_{\text{ацп}}$ – напруга на вході АЦП, В; $U_{\text{ж}}$ – напруга живлення мосту та схеми підсилювача, В; $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт підсилення ДП; $R_{\text{д}}$ – опір давача температури, Ом; $R_{\text{п}}$ – опір з'єднувального проводу, Ом; $R_1 - R_3$ – резистори мосту Уінстона, Ом.

Коефіцієнт підсилення $K_{\text{п}}$ ДП задається згідно з рівнянням (2) за умови, що $R_4 = R_5$ та $R_6 = R_7$ [12]:

$$K_{\text{п}} = \frac{R_7}{R_5}. \quad (2)$$

Для нормування опору давача відносно вхідного діапазону АЦП було побудовано калібрувальний графік згідно з табл. 1 (рис. 3):

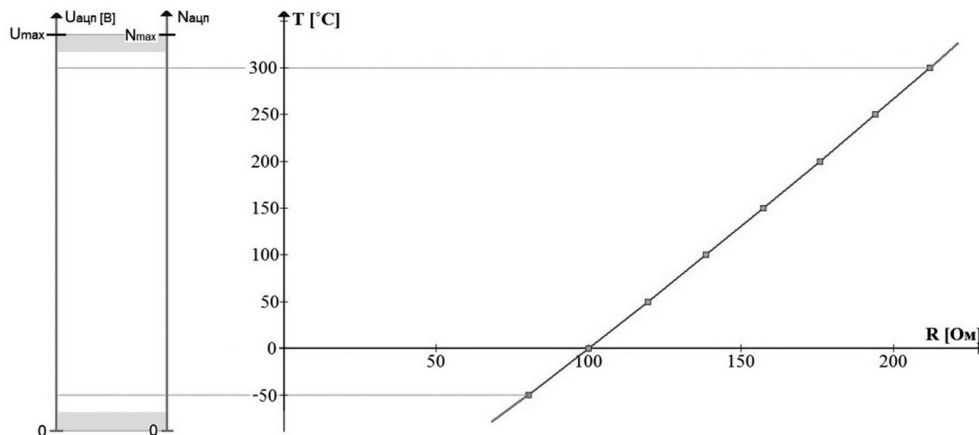


Рис. 3. Калібрувальний графік нормування опору давача по шкалі АЦП

Характеристику перетворювача на рис. 3 зміщено в центр робочого діапазону АЦП з урахуванням запасу по напрузі насичення ОП. Для реалізації нормування функції перетворення згідно з калібрувальним графіком необхідно розрахувати значення резистора мосту R_2 та резисторів $R_4 \dots R_7$, що задають коефіцієнт підсилення ДП.

Для нормування вихідної напруги підсилювача, згідно з калібрувальним графіком, треба розв'язати систему з двох рівнянь із двома невідомими для двох кінцевих частин характеристики робочого діапазону на рис. 3. У системі шуканими величинами є K_{Π} – коефіцієнт підсилення та значення опору резистора R_2 .

$$\begin{cases} U_{80,31} = K_{\Pi} U_{\text{ж}} \left(\frac{R_{\text{д}80,31} + 2R_{\Pi}}{R_1 + R_{\text{д}80,31} + 2R_{\Pi}} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \\ U_{212,05} = K_{\Pi} U_{\text{ж}} \left(\frac{R_{\text{д}212,05} + 2R_{\Pi}}{R_1 + R_{\text{д}212,05} + 2R_{\Pi}} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \end{cases}, \quad (3)$$

де $U_{80,31}$ – напруга на виході ОП при температурі давача -50 °С, мВ; $U_{212,05}$ – напруга на виході ОП при температурі давача 300 °С, мВ; K_{Π} – коефіцієнт підсилення ДП; $U_{\text{ж}}$ – напруга живлення схеми мосту та підсилювача, мВ; $R_{\text{д}80,31}$ – опір при температурі давача -50 °С, Ом; $R_{\text{д}212,05}$ – опір при температурі давача 300 °С, Ом; R_{Π} – опір з'єднувального проводу, Ом; R_1 - R_3 – резистори мосту Уінстона, Ом.

Розв'язок системи рівнянь (3) можна легко отримати за допомогою комп'ютерних математичних програмних пакетів Matchcad, Maple, SMath Studio тощо.

Підставивши отримані значення K_{Π} та R_2 у вираз (1), буде знайдено функцію перетворення опору давача пропорційно напрузі на вході АЦП. Математичний вираз, що характеризує функцію перетворення ідеального АЦП, має вигляд [13]:

$$U_{\text{ацп}} = \frac{NU_{\text{он}}}{2^n - 1}, \quad (4)$$

де $U_{\text{ацп}}$ – напруга на вході АЦП, В; N – значення коду АЦП; $U_{\text{он}}$ – опорна напруга АЦП, В; n – розрядність АЦП.

Підставивши дані формули (4) у формулу (1) та розв'язавши рівняння відносно N , отримаємо функціональну модель $N = f(R_{\text{д}})$ перетворення опору давача в значення коду АЦП згідно з калібрувальним графіком (рис. 3):

$$N = \frac{K_{\Pi} U_{\text{ж}} (2^n - 1) \left(\frac{R_{\text{д}} + R_{\Pi}}{R_1 + R_{\text{д}} + 2R_{\Pi}} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)}{U_{\text{он}}}. \quad (5)$$

З урахуванням виразів (6) отримаємо остаточний вираз функціональної моделі (7):

$$\left[U_{\text{ж}} = U_{\text{он}}; K_{\Pi} = \frac{R_2}{R_5}; n = 12 \right], \quad (6)$$

$$N = 4095 \frac{R_7}{R_5} \left(\frac{R_{\text{д}} + R_{\Pi}}{R_1 + R_{\text{д}} + 2R_{\Pi}} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right). \quad (7)$$

Функціональна модель (7) показує, що вихідний код N АЦП не залежить від значення напруги лінійного стабілізатора U_1 , що доводить ратіометричне живлення схеми на рис. 2.

Для калібрування схеми на рис. 2 запропоновано в роз'єм підключення давача температури J2-J3 під'єднувати прецизійний магазин опору МСР-60М та шляхом імітації опору давача, згідно з табл. 1, задавати функцію перетворення вимірювального каналу визначення температури. Отриманий сигнал вимірювальної інформації несе в собі похибки електронних компонентів схеми (резисторів, ОП, АЦП) при незмінних характеристиках навколишнього середовища. Для відтворення вимірювальним засобом показів температури в °С ПЗ мікроконтролера здійснює перетворення значень відліків N АЦП шляхом розрахунку поліному третього порядку (8). Калібрувальні коефіцієнти давача зберігаються у вбудованій *flash* пам'яті мікроконтролера:

$$T = k_1 N^3 + k_2 N^2 + k_3 N + b, \quad (8)$$

де T – температура, °С; k_1, k_2, k_3 – калібрувальні коефіцієнти; N – значення відліку коду АЦП; b – адитивна складова температурного зсуву, °С.

Магазин опору МСР-60М має діапазон відтворення опору від 0,02 до 1111,11 Ом при класі точності 0,02. Допустима межа основної відносної похибки магазину опору, яка виражена у % від номінального значення включеного опору, визначається виразом (9) при температурі навколишнього середовища 20 ± 2 °С згідно з паспортом на виріб [14]:

$$\delta = \pm \left[0,02 + 2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{R_{\text{max}}}{R} - 1 \right) \right], \%, \quad (9)$$

де δ – відносна похибка магазину опору, %; R – номінальне значення включеного опору, Ом; R_{max} – максимальне значення відтворюваного опору, Ом.

Межі абсолютних похибок, які виражені в °С для платинового давача температури L416 (10), та магазину опору МСР-60М у перерахунку на температури у заданому діапазоні вимірювань графічно наведено на рис. 4.

$$\Delta T = \pm [0,15 + 0,002 |t|], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

де ΔT – абсолютна похибка давача, °С, t – вимірювана температура, °С.

З рис. 4 видно, що абсолютна похибка магазину опору МСР-60М у перерахунку на температуру в заданому діапазоні вимірювань менша, ніж у 3 рази відносно похибки давача L416.

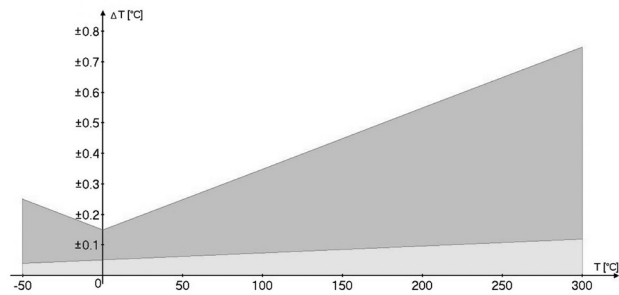


Рис. 4. Відношення граничних значень абсолютних похибок визначення температури за допомогою давача L416 та магазину опору МСР-60М у перерахунку на температуру в заданому діапазоні вимірювань

Калібрування ВП за допомогою магазину опору МСР-60М буде мати систематичну похибку, що спричинена опором під'єднувальних проводів. Наприклад, у разі застосування проводу ШВВП 2x1,5 довжиною 0,5 м та перерізом 1,5 мм² систематична похибка становитиме 0,04 °C. Ця похибка корегується за допомогою адитивної складової температурного зсуву b виразу (8). Похибку калібрування ВП при температурі навколишнього середовища 20 ± 2 °C за допомогою магазину опору МСР-60М може бути оцінено з виразу (11):

$$U_b = \sqrt{U_M^2 + U_{DM}^2 + U_{MP}^2}, \quad (11)$$

де U_b — сумарна стандартна невизначеність по типу В, U_M — невизначеність, обумовлена похибкою магазину опору МСР-60М, U_{DM} — невизначеність, обумовлена дискретністю магазину опору МСР-60М, U_{MP} — невизначеність, обумовлена дискретністю вимірювача температури.

Невизначеність, обумовлена похибкою магазину опору МСР-60М (12):

$$U_M = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,06 \text{ °C}. \quad (12)$$

Невизначеність, обумовлена дискретністю магазину опору МСР-60М (13):

$$U_{DM} = \frac{0,03}{\sqrt{3}} = 0,02 \text{ °C}. \quad (13)$$

Невизначеність, обумовлена дискретністю вимірювача (14), — при роздільній здатності вимірювача температури 0,1 °C:

$$U_M = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,03 \text{ °C}. \quad (14)$$

Сумарна стандартна невизначеність калібрування ВП по типу В (15):

$$U_b = \sqrt{0,06^2 + 0,02^2 + 0,03^2} = 0,07 \text{ °C}. \quad (15)$$

Вираз (15) доводить, що використання магазину опору МСР-60М в якості імітатора давача L416 для калібрування схеми вимірювача температури вносить похибку 0,07 °C.

Висновки

Обрано оптимальне схемне рішення включення ПП із застосуванням давача L416. Це рішення доцільне при живленні від автономних джерел постійного струму, що дозволяє мініатюризувати прилад та сприяє ефективності енергоспоживання.

Виконано нормування вихідної напруги ДП у всьому робочому діапазоні АЦП відповідно до робочого діапазону давача температури.

Розроблено функціональну модель перетворення опору термодавача в цифровий код.

Розроблено спеціалізоване ПЗ для калібрування ВП у всьому робочому діапазоні температур (від мінус 50 °C до 300 °C) давача L416 із застосуванням магазину опору МСР-60М у якості імітатора давача. Сумарна стандартна невизначеність калібрування ВП не перевищує 0,07 °C.

Разработка функциональной модели измерителя температуры

Н. Н. Защепкина¹, М. П. Свита²

¹ Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", пр. Победы, 37, 03056, Киев, Украина
nani1604@gmail.com

² ООО "НПФ "ПРОБА", ул. Пшеничная, 2, 03134, Киев, Украина
max15s@ukr.net

Аннотация

Тонкопленочные платиновые термометры сопротивления различной конструкции и выполнения широко применяются в различных отраслях промышленности. Диапазон измерения температуры данными термопреобразователями лежит в пределах от минус 200 °C до 600 °C.

Предложена функциональная модель портативного цифрового измерителя температуры в диапазоне от минус 50 °C до 300 °C на основе датчика L416 типа Pt100.

Выполнено нормирование выходного напряжения усилителя во всем рабочем диапазоне аналого-цифрового преобразователя в соответствии с рабочим диапазоном датчика температуры.

Разработана функциональная модель преобразования сопротивления термодатчика в цифровой код. Функциональная модель показывает, что выходной код аналого-цифрового преобразователя не зависит от напряжения питания схемы.

Датчик имеет нормированную характеристику зависимости сопротивления от температуры, поэтому для калибровки схемы измерителя температуры использован прецизионный магазин сопротивления МСР-60М. С помощью магазина сопротивления МСР-60М возможна калибровка схемы измерителя температуры с неопределенностью 0,07 °C.

Ключевые слова: измеритель температуры; термопреобразователь; Pt100; мост Уинстона; ратиометрическое питание.

Development of a functional model of the temperature meter

N. Zashchepkina¹, M. Svyta²

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Peremohy Ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine nanic1604@gmail.com

² LLC "RPC "PROBA", Pshenychna Str., 2, 03134, Kyiv, Ukraine max15s@ukr.net

Abstract

Thin-film platinum resistance thermometers of various designs and performance are widely used in various industries. The temperature measurement range of these sensors is from -200 °C to +600 °C.

A functional model of a portable digital temperature meter in the range from -50 °C to +300 °C based on the L416 sensor type Pt100 is proposed. The optimal circuit solution for connecting the L416 sensor to the Winston measuring bridge was selected. The proposed circuit solution is suitable for power supply from autonomous DC sources, which allows for miniaturization of the device and contributes to energy efficiency.

The amplification of the output voltage of the amplifier in the entire operating range of the analog-to-digital converter following the operating range of the temperature sensor has been performed, which allows obtaining the maximum resolution of the analog-to-digital conversion when measuring temperature.

A functional model for converting the resistance of a temperature sensor into a digital code has been developed. The functional model shows that the source code of the analog-to-digital converter does not depend on the supply voltage of the circuit, thus realizing the stability of the function of converting the resistance of the sensor into the value of the code of the analog-to-digital converter.

The sensor has a normalized characteristic of the dependence of resistance on temperature, so a precision resistance box MSR-60M has been used to calibrate the circuit of the temperature meter. With the help of the resistance box MSR-60M, it is possible to calibrate the circuit of the temperature meter with an uncertainty of 0.07 °C.

Keywords: temperature meter; RTD; Pt100; Winston bridge; ratiometric power supply.

Список літератури

1. DIN EN 60751-2009-05. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors (IEC 60751:2008); German version EN 60751:2008. 28 p.
2. Методическая инструкция DKD-R 5-1. Калибровка термометров сопротивления. Национальный метрологический институт Германии. Брауншвейг и Берлин. 2019. Вып. 08. doi: <https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU>
3. ДСТУ 8725:2017. Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення швидкості та об'ємної витрати газопилових потоків. Київ, 2018. 46 с.
4. ДСТУ 8726:2017. Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Методи визначення тиску та температури газопилових потоків. Київ, 2018. 16 с.
5. Heraeus Sensor Technology Dependable platinum thin-film sensors. Product brochure. URL: <http://>

- www.sensorica.ru/pdf/Heraeus_Product_brochure.pdf (дата звернення: 30.12.2020 р.).
6. L 416 Datasheet. Platinum temperature sensor in thin-film technology. URL: https://www.heraeus.com/media/media/hne/datasheets/l_sensors/en_9/l_416_e.pdf (дата звернення: 30.12.2020 р.).
 7. Analog devices. Circuit Note CN-0383. Completely Integrated 2-Wire, 3-Wire, or 4-Wire RTD Measurement System Using a Low Power, Precision, 24-Bit Σ - Δ ADC. URL: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/cn0383.pdf> (дата звернення: 30.12.2020 р.).
 8. Hariharan K., Vasanthakumar P., Varun G., Abhaikumar V. A Method for ADC Error Testing and its Compensation in Ratiometric Measurements. *Measurement Science Review*, 2009, vol. 10, issue 2, pp. 56–59. doi: <https://doi.org/10.2478/v10048-010-0009-3>
 9. Электротехнический справочник. Практическое применение современных технологий: Корякин-Черняк С.Л. (ред.). Санкт-Петербург: Наука и Техника, 2014. 592 с.
 10. Rien Lerone Beal. A low voltage rail-to-rail operational amplifier with constant operation and improved process robustness: *Graduate Theses and Dissertations*. Iowa State University, 2009. 103 p. doi: <https://doi.org/10.31274/etd-180810-113>
 11. Anderson R. Understanding Ratiometric Conversions. Texas Instruments. Application Report SBAA110. March 2004. 10 p.
 12. Мамий А.Р., Тлячев В.Б. Операционные усилители. Майкоп: АГУ, 2005. 192 с.
 13. ATmega8/L datasheet. Atmel Corporation. Rev.2486AA–AVR–02/2013. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf (дата звернення: 30.12.2020 р.).
 14. Паспорт. Магазин сопроотивления МСР-60М. URL: https://www.astena.ru/teh_14.html (дата звернення: 30.12.2020 р.).
 3. DSTU 8725:2017. Air quality. Emissions from stationary sources. Methods for determining the speed and volume flow of gas and dust flows. Kyiv, 2018. 46 p. (in Ukrainian).
 4. DSTU 8726:2017. Air quality. Emissions from stationary sources. Methods for determining the pressure and temperature of gas and dust flows. Kyiv, 2018. 16 p. (in Ukrainian).
 5. Heraeus Sensor Technology Dependable platinum thin-film sensors. Product brochure. Available at: http://www.sensorica.ru/pdf/Heraeus_Product_brochure.pdf (accessed 30.12.2020).
 6. L 416 Datasheet. Platinum temperature sensor in thin-film technology. Available at: https://www.heraeus.com/media/media/hne/datasheets/l_sensors/en_9/l_416_e.pdf (accessed 30.12.2020).
 7. Analog devices. Circuit Note CN-0383. Completely Integrated 2-Wire, 3-Wire, or 4-Wire RTD Measurement System Using a Low Power, Precision, 24-Bit Σ - Δ ADC. Available at: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/cn0383.pdf> (accessed 30.12.2020).
 8. Hariharan K., Vasanthakumar P., Varun G., Abhaikumar V. A Method for ADC Error Testing and its Compensation in Ratiometric Measurements. *Measurement Science Review*, 2009, vol. 10, issue 2, pp. 56–59. doi: <https://doi.org/10.2478/v10048-010-0009-3>
 9. Koryakin-Chernyak S.L. (Ed.). Elektrotekhnicheskij spravocnik. Prakticheskoe primenenie sovremennykh tekhnologiy [Handbook in Electrical Engineering. Practical application of modern technologies]. SPb., Nauka i Tekhnika Publ., 2014. 592 p. (in Russian).
 10. Rien Lerone Beal. A low voltage rail-to-rail operational amplifier with constant operation and improved process robustness. *Graduate Theses and Dissertations*. Iowa State University, 2009. 103 p. doi: <https://doi.org/10.31274/etd-180810-113>
 11. Anderson R. Understanding Ratiometric Conversions. Texas Instruments. Application Report SBAA110. March 2004. 10 p.
 12. Mamiy A.R., Tlyachev V.B. Operatsionnye usiliteli [Operational amplifiers]. Maykop, AGU Publ., 2005. 192 p. (in Russian).
 13. ATmega8/L datasheet. Atmel Corporation. Rev.2486AA–AVR–02/2013. Available at: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf (accessed 30.12.2020).
 14. Pasport. Magazin soprotivleniya MSR-60M [Datasheet. Resistance box MSR-60M] (in Russian). Available at: https://www.astena.ru/teh_14.html (accessed 30.12.2020).

References

1. DIN EN 60751-2009-05. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors (IEC 60751:2008); German version EN 60751:2008. 28 p.
2. Metodicheskaya instruktsiya DKD-R 5-1. Kalibrovka termometrov soprotivleniya [Guideline DKD-R 5-1. Calibration of Resistance Thermometers]. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2019, issue 08. 28 p. (in Russian). doi: <https://doi.org/10.7795/550.20180828ACRU>